



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DIGITALES Y TELECOMUNICACIONES

Trabajo de Monografía

Análisis de los Aspectos Ingenieriles de las Redes SNF para la Optima Canalización del Espectro en Servicios de DTV

Autor:

Br. Melvin Alonso García Barrera,

Carnet: 2008-23693

Br. Christopher David Gaitan Guzman

Carnet: 2007-21961

Tutor:

Ing. Enrique Hernández García

Managua, Nicaragua

Septiembre de 2014

RESUMEN

En el presente proyecto de fin de carrera se describen los aspectos técnicos e ingenieriles que conllevan el diseño de una red de frecuencia única (**SFN**: Single Frequency Network) para televisión digital terrestre, por ser esta técnica un proceso de gran relevancia en la optimización de la canalización en la transmisión de señales televisivas.

ÍNDICE

	Pág.
OBJETIVOS	I
JUSTIFICACION	II
CAPITULO I: GENERALIDADES DE SFN	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 CARACTERISTICAS Y REQUERIMIENTOS	3
1.3 SISTEMA DBV-T EN SFN	15
CAPITULO II: DISEÑO DE RED SFN	19
INTRODUCCION	19
2.1 ANALISIS DE INGENIERIA	19
2.2 RECOMENDACIÓN ETSI EN 300 744	20
2.3 RECOMENDACIÓN ETSI TR 101 190	22
2.4 RECOMENDACIONES UIT-R P.525-2 Y UIT-R P.526-10	26
2.5 RECOMENDACIÓN UIT-R BT.1368-8	28
CAPITULO 3: RADIOPROPÀGACION EN SFN	30
INTRODUCCION	30
3.1 TENDENCIAS DE REDES DE SERVICIOS MULTIMEDIA	30
3.2 MODELOS DE RADIOPROPAGACION EN SFN	33
CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFIA	43

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar el análisis de los Aspectos Técnicos y Funcionales de las Redes SNF que permiten una óptima canalización del espectro radioeléctrico en servicios de DTV.

Objetivos Específicos

- Identificar las técnicas y métodos teóricos que permiten mejorar los procesos de canalización en sistemas de televisión modernos.
- Analizar las características técnicas de las estaciones de transmisión en cuanto a parámetros de desempeño de relevancia, tales como, potencia, frecuencia o canalización y sistema radiante.
- Describir la metodología para el diseño de una red SNF de un operador tomando como referencia las características topográficas de un área de cobertura de interés.

JUSTIFICACIÓN

La propuesta de Análisis de los Aspectos técnicos sistemáticos de ingeniería en el diseño de las Redes SNF para óptimo aprovechamiento del Espectro en Servicios de DTV, surge a partir del inminente desarrollo tecnológico en los sistemas de comunicación por radio difusión debido a los avances registrado en el país por los sistemas digitales en los distintos ámbitos de comunicación y que pronto se espera que incursione los sistemas de televisión digital en Nicaragua.

No obstante en nuestro país, como fue mencionado al inicio, aun no se han desarrollado implantaciones de dicha tecnología, según datos del ente regulador TELCOR, Nicaragua, se encuentra en la fase de armonización con el ente regulador de telecomunicaciones de Brasil, para adoptar el estándar **ISDB-Tb** desarrollado por dicho organismo. Por este tecnicismo, este proyecto se hace oportuno y exploratorio por incursionar en una temática que en el corto plazo generara muchas posibilidades de desarrollo profesional y académico en el país en el área de las telecomunicaciones.

Este proyecto de monografía está enfocado en el análisis de los aspectos técnicos e ingenieriles que conllevan el diseño de una red de frecuencia única para televisión digital terrestre, por ser una etapa crítica en la implementación y control de este tipo de sistemas durante el periodo de transición.

Por ello, este proyecto centra su interés en el área de la televisión digital y su desarrollo será útil debido a la poca difusión e información técnica y funcional de esta tecnología tanto en la universidad, esto implica a las carreras afines y grupos de asignaturas asociadas, como en el país en lo general.

Para el análisis y diseño de una red de frecuencia única para televisión digital terrestre, se necesita de una serie de variables que permiten determinar los requerimientos mínimos para elaborar un diseño adecuado mediante simulaciones que sea lo más cercano a la realidad.

CAPITULO I

GENERALIDADES DE SFN

1.1 INTRODUCCIÓN

Conceptos redes SFN: para comprender el término SFN (red de **frecuencia** única), se debe entender que a diferencia de las redes de frecuencia múltiples (MFN), estas solamente utilizan una frecuencia para difundir la misma información simultáneamente.

Estas redes SFN, consiste en una red de transmisores que emitan la misma información simultáneamente sobre una misma frecuencia, optimizando el ancho de banda, reduciendo la zonas de vacíos que se crean en redes MFN, se obtiene una cobertura mayor y permite la transmisión con bajas potencias.

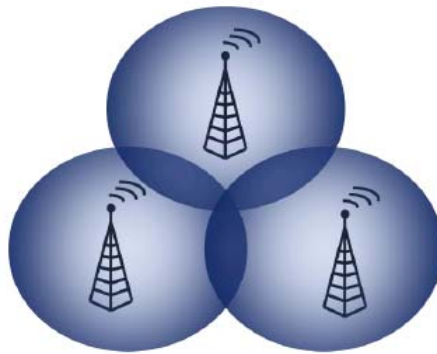


Figura 1: Prototipo de Red de Frecuencia Única (SFN)

Eficiencia en Frecuencia

Con estas redes se pueden cubrir grandes áreas con una frecuencia central común. Desde este punto de vista, las redes de una sola frecuencia parecen ser mucho mejor que las redes de frecuencia múltiple, sin embargo puede haber otras redes similares ofreciendo distintos servicios, en lugares cercanos por lo tanto se debe proceder a utilizar más frecuencias irremediablemente.

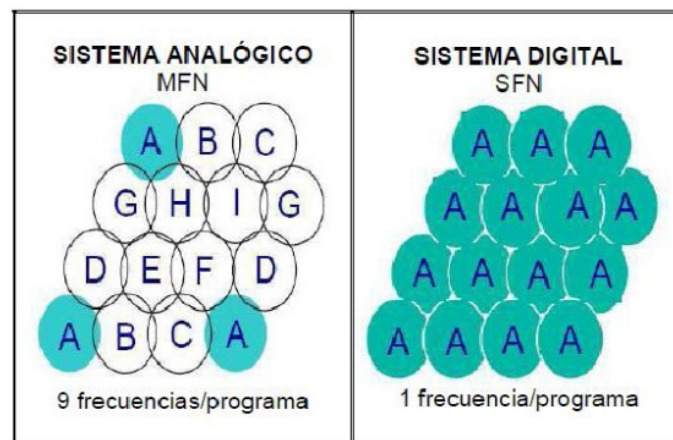


Figura 2: Diferencia entre MFN (Multiple Frequency Network) y SFN

Para la TDT (Televisión digital terrestre), el uso de la redes SFN pueden estar diseñado para cubrir pequeñas o grandes extensiones geográficas con una “única” frecuencia asignada para su funcionamiento. Es decir, se puede tener un programa de televisión dentro de una red compuesta por varios transmisores operando en la misma frecuencia, sin ningún riesgo de interferencia.

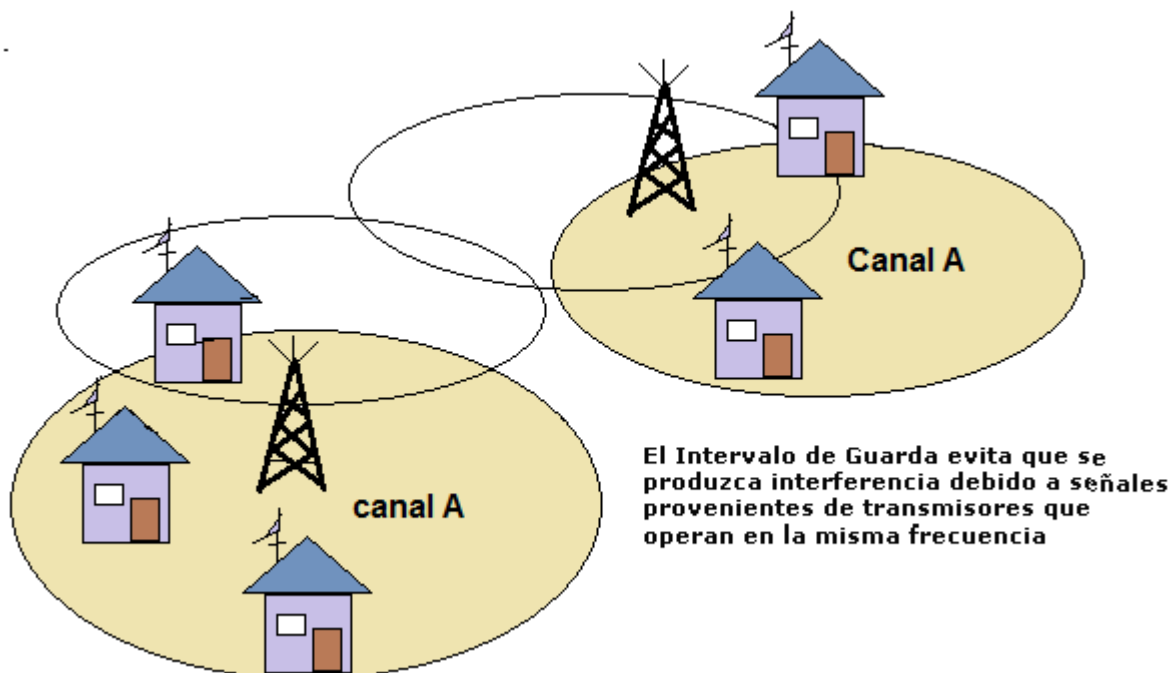


Figura 3: Formación de Redes SFN

Las redes SFN, pueden diseñarse utilizando unas pocas celdas que cubren áreas extensas “celdas grandes” o pueden diseñarse con muchas celdas que cubren áreas relativamente pequeñas “celdas pequeñas”.

Las ventajas de la implementación de una red SFN son:

Eficiencia Espectral

La emisión de un mismo múltiple en una zona geográfica de gran extensión y a la misma frecuencia supone un gran ahorro del espectro radioeléctrico y permite implantar un mayor número de redes de televisión digital terrenal en los países en los que el espectro disponible para estos servicios está saturado. Además, cada múltiple puede transportar un mínimo de 4 programas, con lo que el aumento de la eficiencia es considerable.

Eficiencia en Potencia

En una red SFN, la señal recibida puede provenir de varias componentes de más de un transmisor. Esto hace que en caso de recibir grandes variaciones de intensidad de campo procedentes de un transmisor, éstas se puedan compensar por la recepción de otras componentes, ya sean de otro transmisor o de ecos producidos por la propagación multitrayecto.

1.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y REQUERIMIENTOS

En una red SFN, todos los transmisores se encuentran sincronizados, transmiten la misma señal y operan sobre una misma y única frecuencia. Gracias a la utilización de COFDM y la inclusión del intervalo de guarda en cada símbolo OFDM, las señales de varios transmisores que lleguen a un receptor contribuirán constructivamente al total de la señal deseada, sin provocar interferencia.

Características de las redes de frecuencia única

Las Redes de Frecuencia Única ofrecen una variedad de beneficios frente a las redes planeadas de manera convencional ya que estas últimas utilizan de manera desordenada el espectro radioeléctrico. A través de las SFN, un número de transmisores cubren áreas adyacentes trabajando en la misma frecuencia. En las transmisiones analógicas esto es prácticamente imposible.

Entre algunas de las cualidades de SFN tenemos:

- Posibilidades de “relleno” de áreas sin cobertura utilizando GAP-FILLERS
- Re-utilización de frecuencias en pequeñas distancias, sin inconvenientes de interferencias.
- Eficiencia del Espectro
- Potencia Correcta en el lugar apropiado representa eficiencia de Potencia ya que se puede utilizar varios transmisores distribuidos en áreas específicas.
- Cobertura Uniforme.
- Posibilidad de Limitar e Incrementar el Área de Cobertura.

Para la instalación de una red de frecuencia única se deben cumplir tres condiciones básicas. Bajo cualquier estándar que soporte redes de frecuencia única, los transmisores de una celda SFN deben irradiar:

- Bajo la misma frecuencia.
- Al mismo tiempo.
- Los mismos símbolos OFDM.

El primer requerimiento es sencillo, ya que los transmisores pueden ser configurados para operar en la misma frecuencia de difusión como modulador, en cambio para la otros dos requerimientos se necesita tener más información del proceso de sincronización y además los parámetros de transmisión.

Sincronización de una red SFN

Una red SFN requiere una perfecta sincronización de red a tres niveles (en frecuencia, en tiempo y en bit).

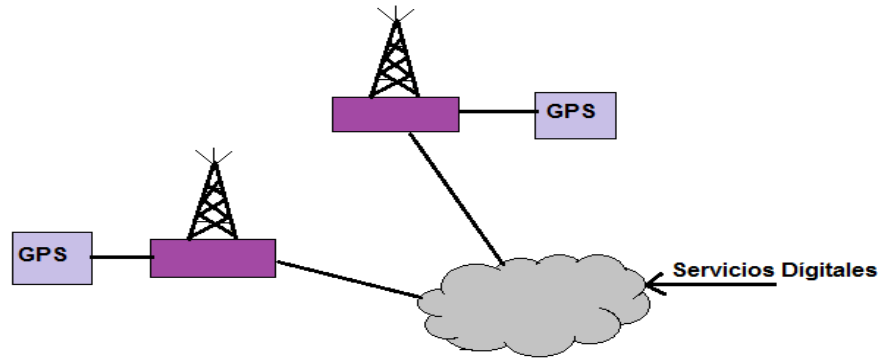


Figura 4: Interconexión entre redes

Las red de frecuencia única o SFN ofrecen ventajas significativas en la difusión de televisión digital terrenal. La principal ventaja es que la eficiencia espectral que se puede obtener, ya que un servicio compuesto por diferentes programas de televisión puede ser difundido en un área extensa o incluso a nivel nacional usando tan sólo un único canal RF.

No obstante, el modo de operación SFN necesita una perfecta técnica de sincronización de red debido a que se necesita radiar la misma información, al mismo tiempo y a la misma frecuencia. Esto se debe al hecho de que cualquier señal a la misma frecuencia que llegue al receptor fuera del intervalo de guarda, pueda interferir. A esto se suman los retardos de distribución, que siguen la señales antes de ser radiadas, ya que los mismos son producidos por el procesamiento de cada uno de los equipos así como del medio de transmisión empleado, como es el caso de la comunicación multiplexor y modulador.

En este sentido en una red de frecuencia única si el modulador y el multiplexor se encuentran juntos y a la vez existe otro centro de transmisión con su multiplexor ubicado en otro lugar, el segundo generaría retardo, que puede ser visto como interferencia en el receptor.

Sincronización en frecuencia

En una red SFN, cada una de las portadoras de la señal OFDM debe ser radiada en la misma frecuencia por todos los transmisores de la red. Dada una portadora de frecuencia ideal, la precisión en frecuencia requerida depende de la separación en frecuencia entre dos portadoras adyacentes (Δf). Así, cada transmisor debería radiar la portadora k-ésima dentro del intervalo.

$$f_k \pm \frac{\Delta f}{1000}.$$

El sistema más utilizado para satisfacer los requisitos de sincronización de toda la red es el sistema GPS (Global Positioning Satellite), que proporciona una frecuencia de referencia estable e idéntica a todos los centros que constituyen la red.

Sincronización temporal

Para aprovechar las características de la modulación OFDM y beneficiarse así de los ecos recibidos dentro del intervalo de guarda, es necesaria la sincronización a nivel temporal de los transmisores. Independientemente del retardo introducido por la red de distribución, todos los transmisores han de emitir el mismo símbolo en el mismo instante de tiempo. El nivel de precisión exigido no es muy elevado debido a la presencia del intervalo de guarda, pero precisamente por este motivo, lo que se quiere es que el intervalo de guarda sea útil para recibir los ecos de la propagación multicamino y no para compensar una mala sincronización de la red. Una precisión de $\pm 1\mu s$ sería suficiente.

Para realizar la sincronización temporal se utiliza una señal de referencia temporal, que consiste en un pulso por segundo, que de la misma forma que la frecuencia de referencia, se puede obtener del sistema GPS.

La sincronización de bit implica emitir el mismo símbolo al tiempo de manera que todas la portadoras estén moduladas igual. Por tanto los mismos bits modulación la misma portadora adecuada.

Parámetros de Transmisión

Características de transmisión

Como se había mencionado previamente, las señales que emiten los transmisores deben ser sincronizadas para disminuir el efecto multi-trayecto en el receptor. La sincronía en los emisores se puede conseguir de diferentes formas. La más utilizada es con un receptor GPS en los transmisores. Este receptor es instalado en cada una de las estaciones de difusión y recibe una señal vía satélite para la sincronización de envío. Es importante recordar que la sincronización no afecta en absoluto a la información que se está emitiendo.

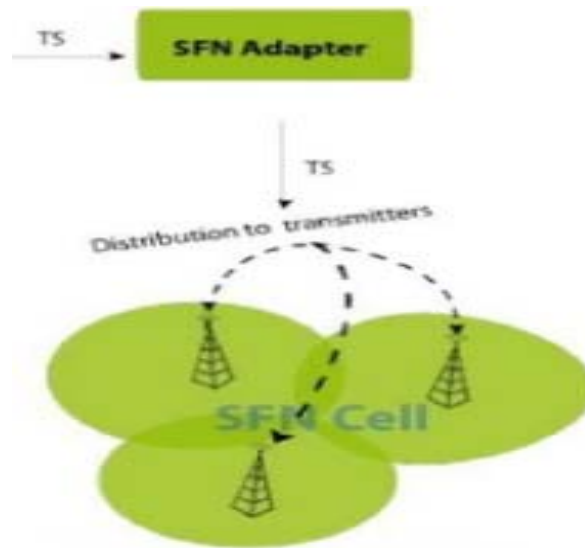


Figura 5: Mecanismo de Transmisión en SFN

En la configuración de esta características se debe considerar que el Adaptador SFN (SFN Adapter). Que será el encargado de incluir al TS (Transport Stream) toda la

información necesaria para la sincronización y opciones adicionales. Las opciones adicionales pueden ser enviadas a los transmisores de manera individual. Información como Retraso de Transmisión (Delay Transmission), desplazamiento de frecuencia (Frequency Offset), etc. Dependiendo del estándar que se esté manejando las opciones adicionales pueden variar. Sin embargo, información adicional como las id de los transmisores (tx_cell_id) es necesaria para los moduladores en cada estación de difusión.

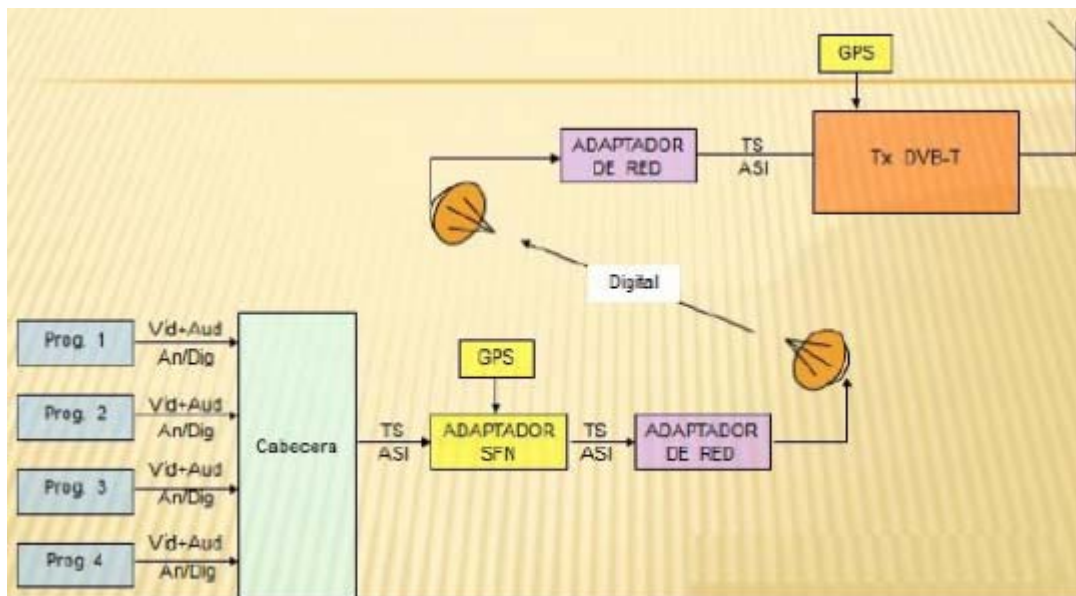


Figura 6: Estructura Interna de un Sistema SFN

Los parámetros de transmisión están también referidos a los bits de TPS (Transmission Parameter Signalling). Estos bits de TPS representan la configuración de modulación como el Intervalo de Guarda, Ancho de Banda y FFT Mode. Por ejemplo, para el estándar DVB-T, la información sería similar a la siguiente.

- 4k mode.
- 5 MHz Bandwidth.
- In-Depth interleaving.
- MPE-FEC.
- Time-Slicing TPS signaling.

MIP Insertion and Megaframe

La norma que especifica la introducción de un MIP en un nuevo grupo de paquetes se denomina Mega frame. El tamaño del mega frame depende de la relación de código (Code Rate) tanto como de la constelación utilizada. Los adaptadores SFN forman un mega frame con una cantidad n de TS-Packets, correspondiendo a 8 frames (o 2 super frames) en el modo 8k, 16 frames (o 4 super frames) en el modo 4k y 32 frames (o 8 super frames) en el modo 2k. El número de paquetes Reed Solomon (RS-Packets) por cada OFDM super frame está en la siguiente tabla.

Tabla 1: Numero de paquetes RS por super trama

Code rate	QPSK			16 QAM			64 QAM		
	2K mode	4k mode	8k mode	2K mode	4k mode	8k mode	2K mode	4k mode	8k mode
$\frac{1}{2}$	252	504	1008	504	1008	2016	756	1512	3024
$\frac{2}{3}$	336	672	1344	672	1344	2688	1008	2016	4032
$\frac{3}{4}$	378	756	1512	756	1512	3024	1134	2268	4536
$\frac{5}{6}$	420	840	1680	840	1680	3360	1260	2520	5040
$\frac{7}{8}$	441	882	1764	882	1764	3528	1323	2646	5292

Para una constelación dada y una relación de código establecida, el tamaño del megaframe es independiente del modo de modulación (FFT). La duración del megaframe solo depende en el ancho de banda del canal y el intervalo de guarda.

Tabla 2: Tiempo de Mega trama

guard interval	Channel Bandwidth			
	8 MHz	7 MHz	6 MHz	5 MHz
$\Delta / T_u = 1/32$	0,502656 s	0,5744640 s	0,6702080 s	0,8042496 s
$\Delta / T_u = 1/16$	0,517888 s	0,5918720 s	0,6905173 s	0,8286208 s
$\Delta / T_u = 1/8$	0,5483520 s	0,6266880 s	0,7311360 s	0,8773632 s
$\Delta / T_u = 1/4$	0,6092800 s	0,6963200 s	0,8123733 s	0,9748480 s

En resumen, el tamaño del mega frame depende de la relación de código y la constelación (independiente del modo FFT), y la duración es determinada en base al

intervalo de guarda y el ancho de banda del canal. El adaptador SFN insertará exactamente un paquete MIP por mega frame. La posición del MIP dentro del mega frame está determinada por el campo “pointer”

Restricción de Frecuencias

Como se había explicado, el clock de 10MHz de referencia es relevante para la sincronización del SFN (valor STS). Sin embargo, no solamente se debe tomar en cuenta la sincronización temporal. Es importante mencionar que en los estándares se utiliza la modulación OFDM que permite hacer frente al desvanecimiento del multi-trayecto. Un gran número de portadoras es usado para llevar esta información. La precisión de 10MHz permitirá a cualquier transmisor perteneciente a una celda SFN a emitir la misma configuración de portadoras.

Al momento de hacer la planificación de una red de frecuencia única, se debe tomar en cuenta los factores de modulación de la señal que se va a manipular. El más importante que se debe tomar en cuenta, es el intervalo de guarda.

Intervalo de Guarda en redes SFN

El intervalo de guarda será aquello que protege a los datos del retardo artificial que pueda ocasionarse por el efecto multi-trayecto. La elección del intervalo de guarda es una situación crítica a la hora de diseñar nuestro sistema. Por un lado un mayor tiempo de guarda se traduce en una disminución de la tasa binaria disponible con lo que los servicios disponibles en la TDT se verían afectados, por otro lado un mayor tiempo de guarda redundaría en la mejora de la ganancia de nuestra red SFN dando así una alta probabilidad de cobertura.



Figura 7: Temporización en SFN

Distancia máxima entre transmisores

Como el intervalo de guarda es aquello que nos determine el retardo mínimo que puede tener una señal para no crear efectos de interferencia, se puede traducir en distancia máxima que puede separarse un transmisor de otro. Utilizando una sencilla relación matemática con la velocidad de la luz.

$$d_{\text{máxima}} = c \cdot T_g$$

$$\text{Donde} \begin{cases} T_g = \text{Duración del intervalo de guarda} \\ c = \text{velocidad de la luz en [m/seg]} \\ d = \text{distancia máxima entre transmisores [m]} \end{cases}$$

Tabla 3: Distancia Máxima entre Transmisores en SFN

	8K		2K	
	Tg	L máxima	Tg	L máxima
1/32	28µs	8.4Km	7 µs	2.1Km
1/16	56 µs	16.8Km	14 µs	4.2Km
1/8	112 µs	33.6Km	28 µs	8.4Km
1/4	224 µs	67.2Km	56 µs	16.8Km

Es esto por lo que se han definido distintas longitudes de guarda dependiendo de las condiciones de implantación. Así por ejemplo, para difundir emisiones locales o regionales este tiempo de guarda podemos considerarlo más pequeño; mientras para grandes redes SFN se hace necesario un intervalo mayor.

En función del ámbito geográfico las redes de frecuencia única se clasifican en:

Redes de ámbito extenso

Se trata de redes de frecuencia única que cubren un gran territorio. Este modelo de red del ámbito extenso se basa en una red regular con transmisores idénticos entre sí, donde cada transmisor tiene asociada un área de cobertura. En conjunto la zona de cobertura de la redes el resultado de la unión de las áreas de cobertura de cada transmisor.

Redes de ámbito reducido

Son redes de frecuencia única de área local que cubren un territorio más reducido, con radio de zona de servicio del orden de 10 a 20 kilómetros y hasta provincias enteras; el modelo de red de ámbito reducido contempla la situación de redes interferentes.

De acuerdo a la ubicación del modulador OFDM las redes SFN se clasifican en:

Redes SFN centralizadas

En este tipo de red SFN con modulación centralizada sólo existe un modulador OFDM para toda la red de transmisores, los servicios de audio y datos son enviados por la red de transporte hasta el lugar donde se realiza el multiplexado y la trama de transmisión es modulada en OFDM, la señal enviada a los transmisores por la red de transporte es la señal modulada. Cada estación transmisora recibe la señal digital modulada y la sitúa en el canal de radio frecuencia asignado. Es necesario utilizar un modulador OFDM para toda la red, independientemente del número de transmisores que constituyan la red SFN

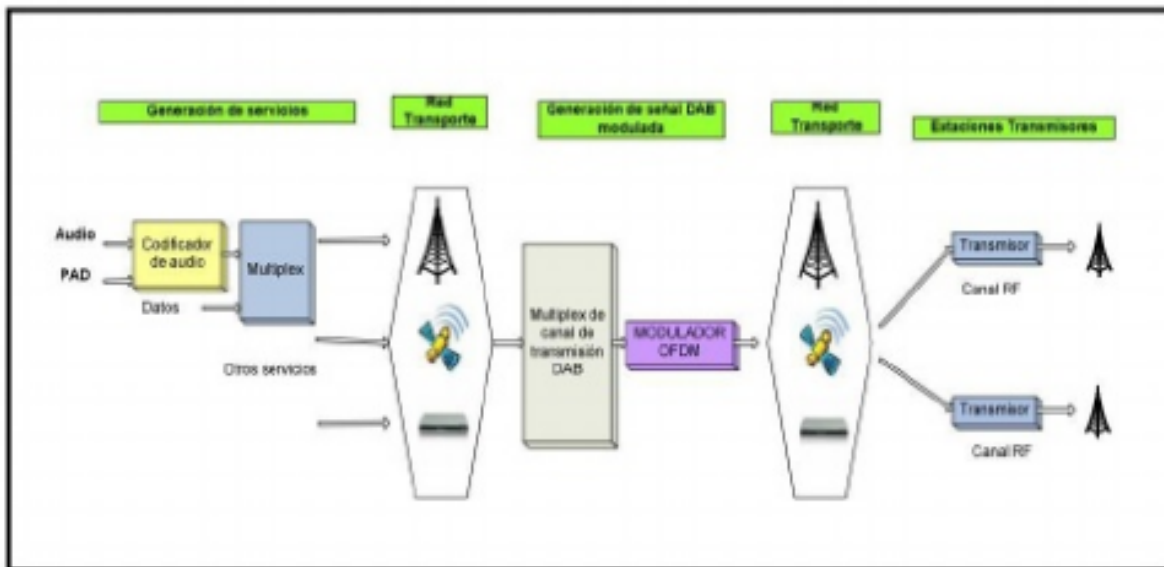


Figura 8: Red Descentralizada SFN

SFN descentralizadas

En redes SFN con modulación descentralizada cada centro transmisor debe disponer de un modulador OFDM, los servicios de audio y datos se envían por la red de transporte hasta el punto donde se realiza su multiplexado, formando la trama de transmisión, la misma que es enviada a la red de transporte y se distribuye la información a todos los transmisores que constituyen la red. En cada uno de los transmisores se recibe la misma trama de la señal digital y se modula utilizando OFDM,

para ser radiada en el canal de radiofrecuencia asignado se tiene un equipo modulador OFDM en cada estación transmisora de la red.

Sincronización de la red

Para la sincronización de los diferentes centros transmisores que constituyen la red de difusión se utilizan sistemas GPS y unidades de distribución de sincronización (SSU).

La siguiente figura describe los bloques funcionales necesarios para una red de difusión en frecuencia única:

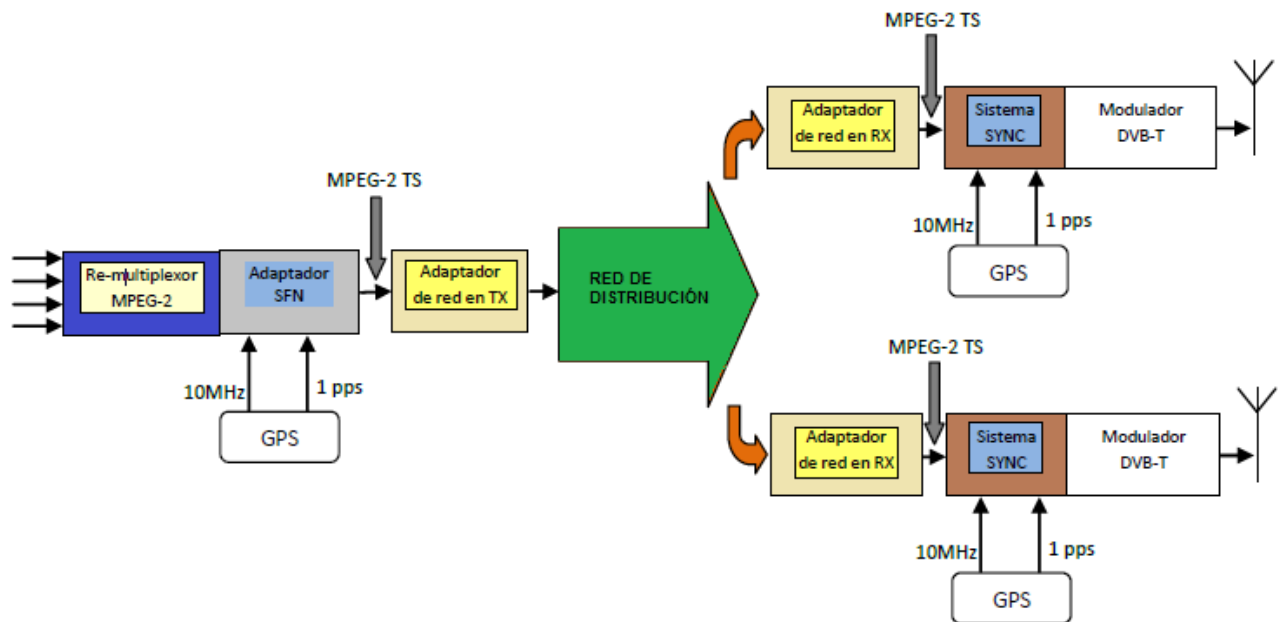


Figura 9: Sistema de Difusión SFN

Los bloques más significantes de la anterior figura son:

- *El Re-multiplexor MPEG-2:* Re-multiplexa los programas que provienen de varios canales de entrada.

- *El Adaptador SFN:* Conformar la Mega-trama e insertar en dicha Mega-trama el Paquete de Inicialización de Mega-trama (MIP) con un PID propio.
- Adaptadores de red: suministran un enlace transparente para las tramas de transporte MPEG-2 desde la central a las estaciones.
- *El sistema de Sincronización (sistema SYNC):* compensa el tiempo de propagación de la señal a través de la red de distribución para que todas las señales de todos los transmisores DVB-T (que recibirán la señal con distinto retardo de propagación) sean transmitidas en el mismo instante de tiempo. Añade el tiempo de espera necesario para transmitir en el instante adecuado.
- *El Modulador DVB-T:* Para que el instante de transmisión sea fijo, el retardo desde que la señal entre en el modulador hasta que llegue a la antena también debe ser fijo. Parte de la información que se inserta en el MIP se puede utilizar para controlar directamente los modos del modulador u otros parámetros de transmisión.
- *El sistema de Posicionamiento Global GPS:* La referencia de tiempo a través de GPS es la única que tiene una disponibilidad a nivel global. Los receptores GPS suministran una frecuencia de referencia de 10 MHz y una referencia de tiempo consistente en 1 pulso por segundo.

1.3 SISTEMA DVB-T EN SFN

Configuración del Sistema

La codificación del canal de transmisión que utiliza DVB-T posee varios parámetros de configuración y determinan la capacidad de transmisión del canal de 6 MHz. Las opciones para el funcionamiento están establecidas en la recomendación ETSI EN 300 744 y se enuncian a continuación:

Tabla 4: Parámetros de Transmisión DVB-T

Ancho de Banda	6 MHz
Modulación de Portadoras	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Tipo de Modulación	Jerárquica y No Jerárquica
Número de Portadoras	2K – 1705 Portadoras, Espaciamiento: 3.348214 Khz. 8K – 6817 Portadoras, Espaciamiento: 0.837054 Khz.
Proporción de Duración del Intervalo de Guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Tasa de código interno para protección de errores	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8

Compresión y Codificación de Audio y Video

La formación del código fuente de audio y video debe ser realizada utilizando el estándar MPEG-2 conforme a lo establecido en ETSI EN 300 744 para DVB-T.

Plataforma de Aplicaciones Interactivas

Todos los concesionarios de frecuencias y los receptores para Televisión Digital deben utilizar DVB-MHP como plataforma para la prestación de servicios interactivos, guías electrónicas de programas y transporte de datos.

Ancho de Banda

Todas las estaciones deben acondicionar sus señales para ocupar un espacio de frecuencia de 6 MHz, conforme a la distribución realizada para la prestación de servicios de televisión digital terrestre.

Intensidad de Campo Eléctrico mínima a Proteger

Para los valores de intensidad de campo, se ha considerado los límites para la recepción en los bordes del área de cobertura secundaria y para la cobertura principal.

a. En el área de cobertura secundaria para propósitos de planeación, el modelo adoptado para la recepción externa considera un dispositivo típico ubicado en el borde del área de servicio, dispone de una antena externa a 10 metros de altura sobre el

suelo, una línea de transmisión y un receptor digital de TV. La mínima intensidad de campo para la recepción externa es indicada en la siguiente tabla:

Tabla 5: Carteristas de Campo Electromagnético en DBV-T

	BANDA I	BANDA III	BANDA IV Y V
<i>Mínima Intensidad de Campo (dBuV/m)</i>	35 FEC 2/3	38 FEC 2/3	46 FEC 2/3
<i>Modulación: 64-QAM</i>	37 FEC 3/4	40 FEC 3/4	48 FEC 3/4

En el área de cobertura principal

Se puede asumir una antena típica ubicada a 1.5 metros de altura sobre el segundo piso de una construcción.

Tabla 6: Campo Mínimo de Recepción en área principal de cobertura

	BANDA I	BANDA III	BANDA IV Y V
<i>Mínima Intensidad de Campo (dBuV/m)</i>	54 FEC 2/3	58 FEC 2/3	65 FEC 2/3
<i>Modulación: 64-QAM</i>	56 FEC 3/4	60 FEC 3/4	67 FEC 3/4

En ambos casos se requiere de una relación mínima de C/N de 17 dB para 64-QAM FEC 2/3 y de 19 dB mínimo para 64-QAM FEC 3/4. (Si se utiliza QPSK o 16-QAM se reduce la relación C/N, pero se sacrifica la capacidad del canal).

El borde del área de cobertura de una estación de televisión, está determinado por el valor de la intensidad de campo mínima a proteger y no sobrepasará los límites de la respectiva zona geográfica.

Las relaciones de protección para los canales analógicos se mantienen conforme a lo expuesto en la Norma Técnica de Televisión Analógica. Para TDT, los valores de las relaciones de protección corresponden a una configuración COFDM 64-QAM FEC 2/3 y 3/4 y rige en las bandas I, III, IV y V.

CANAL INTERFERENTE	RELACIÓN SEÑAL DESEADA / SEÑAL NO DESEADA (CANAL DESEADO = N)			
	Analógico sobre Analógico	Digital sobre Analógico	Analógico sobre Digital	Digital sobre Digital
N - 1 Adyacente Inferior	-6 dB	-11 dB	-26 dB	-24 dB
N (Co-Canal)	+28 dB	+34 dB	+7 dB	+19 dB
N + 1 Adyacente Super.	-12 dB	-11 dB	-26 dB	-24 dB

Medición de las Relaciones de Protección

En el área de cobertura

Para una señal DVB-T, los radios de protección serán medidos preferentemente para un BER de 2×10^{-4} luego del decodificador de Viterbi, correspondiente a un BER menor a 1×10^{-11} a la entrada del demultiplexor MPEG-2 y a aproximadamente un error no por hora.

Junto al transmisor

Se requiere de un BER de 1×10^{-6} antes del decodificador de Viterbi y de 1×10^{-10} a la entrada del demultiplexor MPEG-2

Potencia Radiada Máxima

La potencia radiada máxima de una estación de televisión de VHF o UHF, será aquella que genere una intensidad de campo que no sobrepase el valor de intensidad de campo mínima a proteger en los límites de la respectiva zona geográfica, que cumpla con las relaciones de protección de señal deseada / señal no deseada de esta Norma y Plan y prevalecerá a aquellas determinadas en el estudio de Ingeniería y en el contrato de concesión.

Normalmente las transmisiones digitales requieren de entre un 50% y 75% (-3/-6 dB) menos de potencia para cubrir la misma zona que una transmisión analógica.

Protección Contra Interferencias Previa a la operación de una estación de televisión, deberán realizarse pruebas y mediciones sobre el funcionamiento de la estación, con el

objeto de establecer su normal funcionamiento y el cumplimiento de las condiciones establecidas en la presente Norma Técnica.

Instalación de una Estación

Distancia Mínima Entre Estaciones

La distancia mínima entre estaciones transmisoras, estará determinada por el cumplimiento de las relaciones de protección para co-canal y canal adyacente en el borde del área de cobertura.

Ubicación de las Antenas Transmisoras

Las torres y las antenas deberán cumplir con las regulaciones de la Dirección de Aviación Civil en lo referente a la ubicación y balizas (luces de señalización); y en lo referente a la altura, en las áreas que están bajo las líneas de vuelo y aproximación a aeropuertos.

Uso de Gap-Fillers

De existir zonas pobladas cercanas a donde se encuentra ubicada una estación transmisora, y por su condición geográfica, las señales de TDT no alcanzan el nivel de campo eléctrico requerido, el concesionario está en la posibilidad de utilizar un Gap-Filler (relleno de zonas sin servicio) siempre y cuando no interfiera con otros sistemas y respete su zona de servicio.

Frecuencias auxiliares

Las frecuencias para los enlaces estudio-transmisor, entre repetidoras y más frecuencias auxiliares que se requieran para el servicio de televisión, se asignarán en las bandas destinadas para frecuencias auxiliares del servicio de televisión, indicados en el Plan Nacional de Distribución de Frecuencias.

CAPITULO II

DISEÑO DE RED SFN

INTRODUCCION

El marco de referencia para el diseño de redes SFN debe especificar las normas utilizadas para definir los parámetros del diseño de la red de frecuencia única y las ecuaciones utilizadas para los cálculos correspondientes, tomando como referencia lo establecido por todos los diferentes estudios teóricos y de campo realizados sobre aplicaciones de esta tecnología para así tener una visión más integradora de todos los factores y variables involucrados en este proceso. Por ello este capítulo centra sus esfuerzos en describir los aspectos más relevantes y necesarios a la hora de implementar una red de este tipo

2.1 ANÁLISIS DE INGENIERÍA

El análisis de ingeniería corresponde a la aplicación de las normas y recomendaciones de ITU, ETSI o cualquier organismo de normalización en el tema, en nuestro caso, sobre televisión digital, con el fin de reconocer los parámetros que se deben definir para realizar el diseño de la red de frecuencia única.

El proceso de análisis de ingeniería consiste en estudiar las características de un sistema de televisión digital con los parámetros escogidos, por ejemplo:

- ✓ Carga útil de transmisión: 11,19 Mbps
- ✓ Esquema de Modulación: 16-QAM
- ✓ Tasa de Codificación: 3/4
- ✓ Intervalo de guarda: 1/4

Todo operador interesado en implantar una red de este tipo debe realizar un proceso investigativo para seleccionar el criterio más adecuado para su red, por lo general, en base a estudios ya realizados en Europa, Japón, Brasil USA, Korea del Sur, etc. países a la vanguardia del despliegue de redes digitales de televisión, QPSK tiene una

capacidad de bits muy baja y tiene mayor cobertura, 64-QAM en cambio tiene una gran capacidad de bits pero no soporta recepción de tipo *indoor*, con antena interior, ni movilidad, además que requiere un mayor procesamiento en la recepción y la cobertura disminuye. En cambio la modulación 16-QAM tiene una buena capacidad y soporta recepción con antena interior y también ofrece buena cobertura. Las características de los tipos de modulación se pueden observar en la Figura 1.

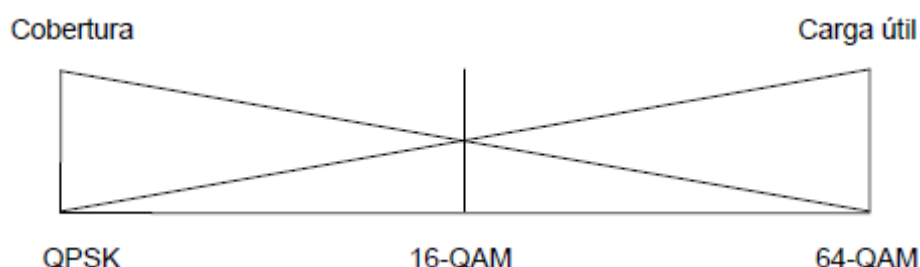


Figura 1: Relación de cobertura y carga útil según el tipo de modulación

A partir de la gráfica se observa que la modulación QPSK tiene una gran cobertura pero un nivel de carga útil muy bajo, al contrario que la modulación 64-QAM, que tiene una gran carga útil pero un bajo nivel de cobertura. El punto medio de esta relación es la modulación 16-QAM, que fue la escogida.

Los valores escogidos de tasa de codificación e intervalo de guarda son pequeños debido a que permiten tener recepción en movilidad y que los dispositivos móviles, cuyos receptores son mucho más sencillos que un receptor fijo, puedan decodificar la señal. El valor del intervalo de guarda escogido también determina la distancia entre transmisores. Dentro del campo del análisis de ingeniería es necesario definir las normas y recomendaciones utilizadas para el diseño de la red.

2.2 Recomendación ETSI EN 300 744

Radio difusión digital de video; Estructura de la trama, Codificación de Canal y modulación para televisión digital terrestre (*Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*).

En esta recomendación se especifican los procesos previamente descritos en el marco conceptual para la adaptación de la señal de televisión antes de la transmisión. Para el diseño de la red de frecuencia única se utilizaron las tablas descritas en esta recomendación con el fin de determinar la tasa de transmisión y el valor de la relación C/N (**Carrier/Noise**, portadora/ruido).

Tasa de Transmisión

Para determinar la tasa de bits o tasa de transmisión se utiliza la Tabla 2 tomada de la recomendación para un canal de 6 MHz. [17]

Tabla 1: Tasa de bits útil (Mbps) según el intervalo de guarda, modulación y tasa de codificación para un canal de 6 MHz.

Modulación	Tasa de codificación	Intervalo de guarda			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,732	4,147	4,391	4,524
	2/3	4,976	5,529	5,85	8,04
	3/4	5,599	6,221	6,587	6,032
	5/6	6,221	6,912	7,318	6,786
	7/8	6,532	7,257	7,684	7,540
16-QAM	1/2	7,465	8,294	8,782	7,917
	2/3	9,953	11,059	11,709	9,048
	3/4	11,197	12,441	13,173	12,064
	5/6	12,441	13,824	14,637	13,572
	7/8	13,063	14,515	15,369	15,080
64-QAM	1/2	11,197	12,441	13,173	13,572
	2/3	14,929	16,588	17,564	18,096
	3/4	16,796	18,662	19,760	20,358
	5/6	18,662	20,735	21,955	22,620
	7/8	19,595	21,772	23,053	23,751

Fuente: Recomendación ETSI EN 300 744.

Relación portadora/ruido C/N

La relación de la potencia de una portadora digital con respecto a la potencia de ruido en el ancho de banda que ocupa también es conocida según la modulación y la tasa de codificación. Es importante recalcar que el estudio se basa en la relación C/N dado que esta indica la calidad de la señal de radiofrecuencia y no en la relación S/N

(**Signal/Noise**, señal/ruido), que muestra la relación de la potencia de una señal analógica con respecto al nivel de ruido. En la televisión digital las señales moduladoras están mezcladas y no son analizadas, únicamente se analizan las portadoras por lo cual se utiliza como referencia esta relación.

En la Tabla 2 se indican los valores de C/N según el tipo de modulación y la tasa de codificación.

Tabla 2: C/N requerido según la modulación y tasa de codificación.

Modulación	Tasa de codificación	Canal Ricean	Canal Rayleigh
QPSK	1/2	4,1	5,9
	2/3	6,1	9,6
	3/4	7,2	12,4
	5/6	8,5	15,6
	7/8	9,2	17,5
16-QAM	1/2	9,8	11,8
	2/3	12,1	15,3
	3/4	13,4	18,1
	5/6	14,8	21,3
	7/8	15,7	23,6
64-QAM	1/2	14,3	16,4
	2/3	17,3	20,3
	3/4	18,9	23,0
	5/6	20,4	26,2
	7/8	21,3	28,6
Fuente: Recomendación ETSI EN 300 744.			

Para recepción de tipo portable se utiliza el canal de Rayleigh, para recepción fija se utiliza el canal Ricean.

2.3 Recomendación ETSI TR 101 190

Radio difusión digital de video; Directrices de aplicación para los servicios de DVB terrestre; aspectos de transmisión (**Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects**).

En esta recomendación se definen los aspectos de planeación de redes tenidos en cuenta para realizar el diseño y que dependen de las características de la red de televisión digital estudiada.

Antena de recepción

La antena de recepción puede ser de tipo fija, portable o móvil. En recepción fija se utiliza una antena receptora direccional ubicada en el techo, y para realizar los cálculos con este tipo de antena se asume una altura de la antena de 10 m sobre el nivel del suelo.

La recepción portable se puede clasificar en dos tipos:

- ✓ La clase A corresponde a la recepción al aire libre o **outdoor**, en donde la altura considerada es de mínimo 1,5 m sobre el nivel del suelo.
- ✓ La clase B es una antena de recepción en interiores o **indoor**, cuya altura mínima es de 1,5 m sobre el nivel del piso dentro de una habitación, en una planta baja o ubicada en una ventana.

Los niveles de recepción para cada tipo de recepción se indican en la Tabla 3

Tabla 3: Recepción nivel de servicio

Tipo de recepción	Nivel de recepción
Outdoor fijo	$\geq 48 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$
Indoor portable	$\geq 79 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$
Outdoor móvil	$\geq 71 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$
Fuente: ACIEM	

La recepción móvil no está abarcada dentro de los límites de este proyecto. Para los cálculos realizados se asume la recepción de tipo **indoor** portable ya que el área estudiada es de tipo urbana.

📶 Área de cobertura

El área de cobertura según la recomendación se clasifica como “buena” si al menos un 95% de los lugares recibe la señal de televisión, y es “aceptable” si al menos un 70% se encuentra cubierto. Para los cálculos se asume un porcentaje de 95% del área de cobertura.

📶 Niveles mínimos de la señal de recepción

Teniendo en cuenta el nivel de C/N estipulado por la recomendación ETSI EN 300 744 es posible calcular el nivel mínimo de intensidad de campo que debe haber en la recepción para establecer un nivel mínimo de potencia según la banda de frecuencia. Para realizar este cálculo se utilizan una serie de tablas y ecuaciones definidas a continuación:

Tabla 4. Nivel mínimo equivalente de la señal de entrada al receptor.

Bandas de frecuencia I, III, IV, V						
Ancho de banda del ruido equivalente	B(Hz)	7,6 * 10 ⁶	7,6 * 10 ⁶	7,6 * 10 ⁶	7,6 * 10 ⁶	7,6 * 10 ⁶
Figura de ruido del receptor	F(dB)	7	7	7	7	7
Potencia de ruido de entrada del receptor	P _n (dBW)	-128,2	-128,2	-128,2	-128,2	-128,2
Relación señal RF /ruido	C/N(dB)	2	8	14	20	26
Potencia mínima de la señal entrada al receptor	P _{s min} (dBW)	-126,2	-120,2	-114,2	-108,2	-102,2
Voltaje mínimo equivalente a la entrada del receptor	U _{s min} (dBμV)	13	19	25	31	37
Fuente: Recomendación ETSI TR 101 190.						

Las ecuaciones utilizadas para realizar los cálculos de los valores expuestos en la Tabla 5 son las siguientes:

$$P_n = F + 10 * \log(k * T_0 * B)$$

Donde k es la constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ J/K) y T₀ temperatura absoluta (290 K).

$$P_{s \min} = P_n + C/N$$

$$U_{s \min} = P_{s \min} + 120 + 10 * \log(Z_i)$$

Donde Z_i (75Ω) es la impedancia de entrada al receptor.

Para calcular la densidad de flujo de potencia mínima o la intensidad de campo equivalente para un porcentaje del 95% de las ubicaciones, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\varphi_{\min} = P_{s \min} - A_a$$

Donde φ_{\min} es la mínima densidad de flujo de potencia en el receptor (dBW/m²) y A_a es la apertura efectiva de la antena en dBm².

$$E_{\min} = \varphi_{\min} + 120 + 10 * \log(120 * \pi)$$

$$E_{\min} = \varphi_{\min} + 145,8$$

Donde E_{\min} es la densidad mínima de campo equivalente en el receptor (dBμV/m)

$$\varphi_{\text{med}} = \varphi_{\min} + P_{\text{mmn}} + C_l + L_h + L_b$$

Donde φ_{med} es la mediana de la mínima densidad de flujo de potencia, que es el valor que se utiliza para hacer la planeación de redes (dBW/m²). P_{mmn} es la tolerancia por el ruido introducido por el hombre, L_h es el factor de corrección de ubicación, L_b es la pérdida por altura y es la pérdida por penetración de edificios.

$$E_{\text{med}} = \varphi_{\text{med}} + 120 + 10 * \log(120 * \pi)$$

$$E_{\text{med}} = \varphi_{\text{med}} + 145,8$$

Donde E_{med} es la mediana de la intensidad de campo mínima equivalente, también es el valor utilizado para planeación (dBμV/m). Estos cálculos se encuentran en la Tabla 5 para una probabilidad de ubicación del 95%:

Tabla 5: Densidad de flujo de potencia e intensidad de campo en banda IV para recepción portable *indoor*.

Frecuencia f (MHz)		500				
C/N mínimo requerido por el sistema (dB)		2	8	14	20	26
Potencia mínima de la señal entrada al receptor	P _{s min} (dBW)	-126,2	-120,2	-114,2	-108,2	-102,2
Voltaje mínimo equivalente a la entrada	U _{s min} (dBμV)	13	19	25	31	37
del receptor, 75 Ω						
Ganancia de la antena relativa al dipolo de media onda	G _a (dB)	0				
Apertura efectiva de la antena	A _a (dBm ²)	-13,3				
Mínima densidad de flujo de potencia en el receptor	φ _{min} (dBW/m ²)	-112,9	-106,9	-100,9	-94,9	-88,9
Intensidad de campo mínima equivalente en el receptor	E _{min} (dBμV/m)	33	39	45	51	57
Tolerancia por el ruido introducido por el hombre	P _{mmn} (dB)	0				
Pérdida por altura	L _h (dB)	12				
Pérdida por penetración de edificios	L _b (dB)	7				
Probabilidad de ubicación: 95%						
Factor de corrección de ubicación	C _l (dB)	14				
Mediana de la mínima densidad de flujo de potencia	φ _{med} (dBW/m ²)	-79,9	-73,9	-67,9	-61,9	-55,9
Mediana de la intensidad de campo mínima equivalente	E _{med} (dBμV/m)	66	72	78	84	90
Fuente: Recomendación ETSI TR 101 190.						

2.4 Recomendaciones UIT-R P.525-2 y UIT-R P.526-10

La recomendación UIT-R P.525-2 permite realizar el cálculo de la atenuación en el espacio libre, lo cual es una referencia fundamental en ingeniería radioeléctrica y en enlaces de telecomunicaciones. Este cálculo se realiza dependiendo del tipo de servicio

a estudiar, en este caso es un enlace de tipo punto a zona, por lo cual se puede calcular la intensidad de campo en un punto como lo indica la ecuación:

$$e = \frac{\sqrt{30 \cdot \text{pire}}}{d}$$

Donde e es la intensidad de campo (V/m), pire es la potencia isotrópica radiada equivalente (W) y d es la distancia del transmisor al punto considerado (m).

Como la intensidad de campo es conocida, se pretende con esta ecuación calcular el valor de pire y a su vez conocer el valor de la potencia requerida por el transmisor como se indica en las ecuaciones:

$$\text{pire} = \frac{(e \cdot d)^2}{30}$$

$$P = \frac{\text{pire}}{G}$$

Donde P (W) es la potencia de transmisión requerida y G (W) es la ganancia de la antena de transmisión.

Teniendo en cuenta las pérdidas por transmisión la potencia requerida incluyendo pérdidas se calcula con la ecuación:

$$P_{tx} = P + L_{tx}$$

Donde P_{tx} (dB) es la potencia de transmisión requerida y L_{tx} (dB) son las pérdidas por transmisión que para este caso son de 2 dB.

La relación de potencia entre los sistemas análogo y digital se encuentra expresada en las ecuaciones:

$$\frac{P_a}{P_d} = \frac{P_a(W)}{P_d(W)}$$

$$P_a(\text{dB}) - P_d(\text{dB}) \cong 10 * \log \frac{P_a}{P_d}$$

Donde P_a es la potencia para transmisión análoga y P_d es la potencia para transmisión digital.

La recomendación UIT-R P.526-10, permite un análisis geométrico del perfil radioeléctrico y así mismo evalúa el efecto de la difracción en la intensidad de campo recibida teniendo en cuenta los diferentes tipos de obstáculos y geometrías de trayecto.

2.5 Recomendación UIT-R BT.1368-8

Criterios para la planificación de servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas. Servicio de radiodifusión (televisión).

Esta recomendación establece los valores de protección que se deben tener en cuenta para evitar interferencias en la planificación de sistemas de televisión digital terrestre. La relación de protección corresponde al valor mínimo de la relación entre la señal deseada y la señal no deseada y se expresa en dB. Este valor se mide a la entrada del receptor.

El sistema DVB-T puede ser interferido por cuatro tipos de señales: señal de televisión digital terrestre DVB-T, señal de televisión análoga, señales de audio análogas o señales de radiodifusión de audio digital T-DAB (**Digital Audio Broadcasting**).

Para cada una de estas señales existe una relación de protección que se debe tener en cuenta con el fin de evitar interferencias, sin embargo, en la recomendación no se han establecido las relaciones correspondientes entre NTSC y DVB-T para un canal de 6 MHz.

En la Tabla 6 se indica la relación de protección cocanal para una señal de televisión digital terrestre DVB-T interferente. Este valor depende de la modulación y de la tasa de codificación para un canal Gaussiano, canal de Rice y canal de Rayleigh. Como se especificó previamente, este último se trabaja para recepción de tipo portable.

Tabla 6: Relaciones de protección cocanal de una señal DVB-T interferida por una señal DVB-T.

Modulación	Tasa de codificación	Canal Gaussiano (dB)	Canal de Rice (dB)	Canal de Rayleigh (dB)
QPSK	1/2	5	6	8
QPSK	2/3	7	8	11
16-QAM	1/2	10	11	13
16-QAM	2/3	13	14	16
16-QAM	3/4	14	15	18
64-QAM	1/2	16	17	19
64-QAM	2/3	19	20	23
64-QAM	3/4	20	21	25
Fuente: Recomendación UIT-R BT.1368-8.				

La relación de protección de una señal DVB-T interferente en los canales adyacentes inferior y superior se indica en la Tabla 7.

Tabla 7: Relaciones de protección de una señal DVB-T interferida por una señal DVB-T en los canales adyacentes.

Canal	N-1 (dB)	N+1 (dB)
Radio de protección	-30	-30
Fuente: Recomendación UIT-R BT.1368-8.		

CAPITULO III

RADIOPROPAGACION EN SFN

INTRODUCCION

En este capítulo se describe la idoneidad de diferentes modelos de propagación para despliegues de redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) móvil sobre la banda de UHF. La precisión de los modelos de propagación de la señal es un aspecto clave para la planificación y minimización de costos de infraestructura de este tipo de redes, que se basan en estándares de radiodifusión tales como DVBT/ H, DVB-T2 o el futuro estándar para terminales móviles DVB-NGH. Aquí se analizan tres modelos de propagación: Okumura-Hata, Xia-Bertoni, un modelo basado en la fórmula de Hata que añade un término de difracción calculado usando el método de Deygout y el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami. Para evaluar el rendimiento de estos modelos es necesario una vez diseñada la red realizar mediciones sobre el área de cobertura objetivo de cualquier proyecto y con diferentes condiciones, como son la altura del transmisor, el entorno y los datos geográficos de los que se dispone; con el propósito de evaluar la variabilidad de la señal recibida en función del escenario, lo que supone un factor clave para un dimensionado eficiente de la red.

3.1 TENDENCIAS DE REDES DE SERVICIOS MULTIMEDIA

Las tecnologías de 3G y 4g, han previsto un fuerte crecimiento en el consumo de servicios multimedia en dispositivos móviles motivado por el creciente éxito de este tipo de tecnología (teléfonos inteligentes, tabletas, etc.). Paradójicamente, uno de los servicios multimedia que no ha conquistado de forma masiva los teléfonos móviles es quizás el más común e importante de ellos: la televisión digital. La televisión móvil es un factor clave para el desarrollo de la sociedad de la información, porque permite el acceso universal, en cualquier momento y lugar, a contenidos multimedia. Además, permite abrir nuevas vías de negocio para los agentes de la industria audiovisual y de las telecomunicaciones.

La prestación de servicios de TV orientados a terminales móviles supone la necesidad de emplear redes de radiodifusión de televisión como complemento a las redes celulares. Sólo estas redes tienen la capacidad necesaria para soportar un consumo a gran escala de este tipo de servicios, ya que pueden distribuir servicios multimedia de banda ancha en áreas extensas sin limitación alguna en el número de usuarios que pueden recibir el servicio.

El desarrollo de nuevas tecnologías para la difusión de servicios de televisión hace posible la reutilización, en gran medida, de la infraestructura de red existente (que generalmente opera sobre frecuencias de la banda de UHF) sin que sea necesario el despliegue de nuevas redes dedicadas a la difusión de televisión digital móvil. El consorcio europeo DVB (*Digital Video Broadcasting*) ha desarrollado un perfil de transmisión de TDT móvil, DVB-T2 Lite (*2nd Generation Lite*) que pretende ser la antesala del nuevo estándar de difusión de televisión en movilidad DVB-NGH (*Next Generation Handheld*), que dio sus inicios operativos a finales de 2011.

Una de las principales inquietudes a la hora de poner en marcha un servicio de TDT móvil reside en el costo de la infraestructura de red. Los terminales móviles sufren condiciones de propagación más severas que los receptores fijos no sólo por las mayores pérdidas de propagación sino también por los efectos de desvanecimiento de la señal debidos a la propagación multirayecto y el ocultamiento producido por la movilidad de los usuarios.

A causa de la imposibilidad de los centros transmisores de televisión digital de aumentar la potencia de emisión, para evitar interferencias y para no sobrepasar los límites de exposición regulados por la legislación internacional vigente, en muchos casos se requiere de nuevos emplazamientos para la instalación de transmisores adicionales o reemisores (*gap-fillers*) que complementen las actuales torres transmisoras (Gómez- Barquero, Bria, Monserrat, & Cardona, 2006). Esta penalización es particularmente evidente para áreas de gran cobertura (mayores del 90%) e implica grandes inversiones en infraestructuras, siendo especialmente costoso garantizar la

cobertura en el porcentaje residual donde se encuentran las ubicaciones peor cubiertas (Bria & Gómez-Barquero, 2005).

Para realizar ejercicios de planificación se requiere estimar el nivel de cobertura en el área de servicio objetivo para cada una de las posibles configuraciones de la red, así como un modelo de costo detallado con la información del costo de usar cada uno de los transmisores considerados en cada posible emplazamiento. A fin de calcular de forma precisa el área de cobertura de televisión móvil en una red de difusión es necesario predecir la potencia recibida en cada ubicación desde cada uno de los emplazamientos transmisores de la red y determinar qué señales contribuyen a la señal recibida total y cuáles son las causantes de autointerferencias.

Este capítulo analiza y compara el rendimiento de varios modelos de propagación para redes móviles de TDT con el objetivo de definir la metodología para calcular las pérdidas de propagación en función de distintos parámetros, como son el escenario de despliegue, la altura del transmisor y la disponibilidad de información geográfica para las predicciones. Los modelos de propagación estudiados son el modelo de propagación de Xia-Bertoni, un modelo que combina la fórmula de Hata con un término de difracción calculado usando el método de Deygout y el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami, que ha sido evaluado para entornos andinos por adaptarse particularmente bien a sus características (García, Ortega, Navarro, & Rodríguez, 2003). Estos modelos de propagación han sido seleccionados debido a que pueden operar dentro de la banda de UHF y porque tienen en cuenta la información sobre el terreno y los edificios para realizar el cálculo en ciudades y zonas urbanas.

Por otro lado, se ha estudiado la variabilidad de la señal recibida para un escenario rural y un escenario urbano según los valores recomendados por ITU o ETSI.

3.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN EN SFN

La predicción del nivel de señal necesita tener en cuenta los mecanismos de reflexión, difracción y scattering que sufre la señal desde el transmisor hasta el receptor. El modelado de la propagación depende de muchos parámetros, como el entorno, la altura de los transmisores, la frecuencia y la información disponible sobre el escenario de despliegue.

Cuando se diseña una red de TDT móvil, deben considerarse una serie de aspectos antes de seleccionar el modelo de propagación adecuado: la precisión de los cálculos, la exactitud y resolución de la información cartográfica disponible, la distancia media entre transmisor y receptor, la frecuencia y el tamaño del área de despliegue.

Generalmente, los modelos de propagación pueden clasificarse en tres tipos: deterministas, empíricos y físico-estadísticos. Los modelos deterministas calculan matemáticamente las pérdidas de propagación usando fórmulas teóricas; para ello requieren información precisa sobre el escenario de despliegue no sólo referente al terreno y los edificios sino también sobre los coeficientes de reflexión y difracción de las superficies. En el caso de despliegues de TDT móvil en zonas extensas la información es, en general difícil o incluso imposible de obtener. Los modelos físicoestadísticos combinan modelos deterministas con estadísticas sobre el entorno, con el fin de disminuir el costo computacional. Finalmente, los modelos de propagación empíricos estiman el radio enlace a partir de medidas.

En este apartado nos centraremos en describir la aplicabilidad de los modelos de propagación de Xia-Bertoni (Xia & Bertoni, 1992) (modelo físico-estadístico) y el modelo basado en la fórmula de Hata (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda, 1968), que añade las pérdidas por difracción usando el método de difracción de Deygout (Deygout, 1966) (modelo empírico y cálculo de la difracción determinista) al modelado de la propagación. Estos modelos de propagación han sido seleccionados porque pueden calcular las pérdidas de propagación sobre la banda de UHF y no necesitan información cartográfica demasiado precisa para estimar las pérdidas de difracción. Por esta razón

ambos modelos de propagación son adecuados para realizar predicciones en área de servicio grandes.

Por otro lado, se estudia también un concepto clave para el dimensionado de una red que presta servicios a terminales portátiles y móviles: la variabilidad de las ubicaciones (Location Variability). En este tipo de escenarios la combinación de una recepción con antenas no directivas unida a la falta de visión directa al transmisor conlleva que existan fuertes variaciones en el nivel de señal, que pueden causar fallos en el enlace debido a que el nivel de señal puede sobrepasar el mínimo valor de C/N requerido.

Modelo de propagación radio de Xia-Bertoni

Xia-Bertoni (Xia & Bertoni, 1992) es un modelo de propagación físico-estadístico que describe la propagación de la señal en la banda UHF (opera desde 300 MHz a 3 GHz) en ciudades donde la altura de los transmisores es cercana a la altura media de las azoteas. El modelo tiene en cuenta los perfiles del terreno y los edificios para estimar las pérdidas de propagación. Para cada punto de cálculo el modelo de Xia-Bertoni añade un término de pérdidas de difracción que depende en la media de la altura de los edificios situados entre transmisor y receptor.

Para el modelo de propagación de Xia-Bertoni las fórmulas matemáticas que deben ser ajustadas son las siguientes:

$$L(dB) = A + B \cdot \log(d) + C \cdot \log(f) + D \cdot \log(\alpha) + E \cdot \log(b) + F \cdot \log(r) + G \cdot \log \beta$$

$$r = \sqrt{h_m^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2}$$

Donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor en km, f es la frecuencia de operación en MHz, b es la separación media entre edificios, hm es la altura del receptor y w es el ancho medio de las calles.

Modelo de propagación radio de Hata+Deygout

Hata (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda, 1968) es un modelo de propagación empírico que toma la información de campo obtenida por Yoshihisa Okumura, y desarrolla un conjunto de ecuaciones para las pérdidas de propagación. El modelo de propagación es adecuado para frecuencias desde 150 a 1500 MHz, con alturas de la estación base de 30 a 200 m, y para distancias entre transmisor y receptor de 1 a 20 km.

Okumura-Hata es un modelo de propagación simple que no requiere de información cartográfica para la estimación de las pérdidas de propagación. Por esta razón, una de las limitaciones del modelo de Hata es que no tiene en cuenta la difracción producida por los obstáculos situados en el camino de propagación entre transmisor y receptor.

Para solventar esta limitación, las pérdidas de difracción son calculadas y añadidas a las pérdidas estimadas por el modelo de propagación de Hata. Estas pérdidas por difracción son calculadas mediante el método de difracción de Deygout (Deygout, 1966), que considera que los efectos producidos por los edificios pueden ser aproximados por múltiples aristas de filo de cuchillo y estima las pérdidas producidas por los obstáculos más altos entre transmisor y receptor.

Cuando se usa el modelo de Hata+Deygout, la siguiente fórmula permite realizar las predicciones:

$$L(dB) = A_1 + B_1 \log(d) + C_1 \log(f) + D_1 \log(h_b) \\ + E_1 \cdot Diffraction + F_1 \log(d) + G_1 \log(h_m)$$

Donde d es la distancia entre transmisor y receptor en km, f es la frecuencia de operación en MHz, *Diffraction* es el término de difracción calculado con el método de Deygout, y h_b y h_m son las alturas efectivas de transmisor y receptor en m, respectivamente.

En consecuencia, la principal diferencia entre los modelos de propagación de Xia-Bertoni y Hata+Deygout es que el primero de ellos hace una aproximación del perfil de los edificios entre transmisor y receptor y el segundo toma en consideración el perfil real de los edificios para realizar los cálculos.

Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami

El modelo COST 231 Walfisch-Ikegami (Damosso, 1999) surge de la combinación del modelo de Walfisch-Bertoni, del modelo de Ikegami y de las contribuciones de los miembros del COST 231 Subgroup on Propagation Models. Este modelo está indicado para sistemas que operen en la banda UHF de 800 MHz a 2000 MHz en entornos urbanos densos. El modelo tiene en cuenta la altura de los edificios, el ancho de las calles, la separación entre edificios y el sentido de las calles respecto a la propagación de la señal.

El modelo distingue entre dos escenarios distintos a los que aplica las siguientes fórmulas. Las pérdidas de propagación cuando existe línea de vista (LOS) se calculan mediante:

$$L_b(dB) = 42.6 + 26 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f)$$

Donde d es la distancia horizontal entre transmisor y receptor en km y f es la frecuencia de la portadora expresada en MHz.

En el caso de no existir línea de vista (NLOS) al transmisor, las pérdidas se calculan como:

$$L_b = L_0 + \begin{cases} L_{rts} + L_{msd} & \text{si } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ 0 & \text{si } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}$$

$$L_0(dB) = 32.4 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f)$$

Donde L_0 son las pérdidas por espacio libre, d es la distancia horizontal entre transmisor y receptor en km, f es la frecuencia de la portadora en MHz, L_{rts} son las pérdidas por difracción producidas en el techo del último edificio por el que se propaga la señal

dadas en función de la altura del transmisor y del receptor y de la orientación de las calles y L_{msd} son las pérdidas por difracción de múltiples esquinas de los techos de los edificios.

Metodología de la calibración

A través de medidas es posible comparar el nivel de señal calculado y seleccionar aquellos modelos de propagación adecuados a las diferentes condiciones de recepción.

La calibración de los modelos de propagación consiste en variar sus parámetros característicos a fin de minimizar la diferencia entre predicciones y medidas. Las pérdidas de propagación se calculan utilizando fórmulas que modelan los diferentes mecanismos físicos que sufre la señal en el camino de propagación entre transmisor y receptor.

La contribución de los diferentes mecanismos de propagación es ponderada en función de parámetros como el entorno de propagación o la altura del transmisor. La contribución de cada término en las pérdidas totales se fija a través de los resultados de las campañas de medidas.

El método matemático utilizado para el ajuste de los modelos de propagación bajo estudio es el método de mínimos cuadrados (*LMS – Least Mean Squares*), el cual intenta minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre las medidas y las predicciones (Moon & Stirling, 2000). Los parámetros a optimizar son A , B , C , D , E , F y G para el modelo de Xia-Bertoni, y $A1$, $B1$, $C1$, $D1$, $E1$ y $F1$ para el modelo de Hata+Deygout.

Siendo y_i un conjunto de medidas y L_i un conjunto de predicciones, la suma de los cuadrados de los residuos es:

$$S = \sum_i (y_i - L_i)^2$$

El método LMS intenta encontrar coeficientes que minimicen S . Estos coeficientes igualan a cero la derivada de S con respecto a cada uno de ellos. Como resultado, la ecuación del sistema a resolver es la siguiente:

$$L_i = x \cdot a_i + y \cdot b_i + z \cdot c_i + \dots$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 2 \cdot \sum_i (y_i - L_i) \cdot \frac{\partial L_i}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial y} = 2 \cdot \sum_i (y_i - L_i) \cdot \frac{\partial L_i}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 2 \cdot \sum_i (y_i - L_i) \cdot \frac{\partial L_i}{\partial z} = 0$$

Variabilidad de la ubicación

Existen diversas recomendaciones publicadas por organismos internacionales como ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) o ITU-R (*International Telecommunications Union -Radiocommunications Sector*) que establecen unos factores de corrección a tener en cuenta a la hora de realizar una planificación de una red de TDT.

Los valores teóricos del factor de corrección pueden derivarse de la desviación estándar, asumiendo que el campo eléctrico presenta unas variaciones acordes con una distribución log-normal:

$$\text{Factor de Corrección de la Ubicación (dB)} = Q_i\left(\frac{q}{100}\right) \cdot \sigma_L(f)$$

Donde $Q_i(x)$ es la función de acumulación inversa de la distribución normal del campo, q es la cobertura objetivo y σ_L es la desviación típica de la ubicación. Para analizar la variabilidad de la señal se definen celdas de tamaños entre 5x5 m y 500x500 m.

De las medidas tomadas, aquellas que corresponden a estos tamaños de celda, es decir, que se encuentran separadas hasta un máximo de 5 o 500 m (respectivamente para los casos mencionados) se calcula su desviación típica. Así, se obtiene una predicción de la variación de la señal en función de la distancia entre las medidas. Este resultado será decisivo para calcular la potencia de señal recibida en función del escenario considerado y de la resolución de la información cartográfica de la que se dispone.

En concreto, la recomendación ITU-R 1546 (ITU-R, 2009) establece un factor de corrección de 5.5 dB para un tamaño estándar de celda de 100x100 m. ETSI establece en las guías de implementación de los estándares de difusión terrestre DVB-H (ETSI, 2009) y DVB-T (ETSI, 2008) unos valores entre 3 dB y 9 dB para coberturas del 70% y 95%, respectivamente.

Los modelos de propagación radio UHF para el despliegue de redes de TDT móvil presentados en este capítulo son aplicables a redes que operan en UHF basadas en los estándares DVB-H/T, DVB-T2, DVB-T2 Lite o DVB-NGH. La elección del modelo de propagación adecuado debe llevarse a cabo tomando en consideración el escenario de despliegue, la información cartográfica disponible, la altura del transmisor y el perfil del terreno del escenario considerado. Es importante también realizar medidas con el fin de ajustar los parámetros característicos de los modelos de propagación.

La elección del modelo de propagación más adecuado depende fuertemente de la altura del transmisor. Cuando el transmisor es alto, Okumura-Hata y Xia-Bertoni no modelan el desvanecimiento de la señal. El modelo de Hata+Deygout es adecuado para este tipo de escenarios, pero debe ser calibrado para ajustarse a la frecuencia del despliegue y al entorno. Si la altura del transmisor es comparable a la de los edificios, el modelo de Xia-Bertoni calibrado proporciona mejor exactitud que el modelo de Hata+Deygout.

Las predicciones son más fiables si la difracción se modela a partir de la información del terreno y los edificios; sin embargo, cuando no se dispone de este tipo de información, los modelos de propagación empíricos ofrecen una buena aproximación al valor medio de la señal recibida.

Finalmente, para terrenos montañosos el modelo más apropiado es el de Xia-Bertoni, que tiene en cuenta los perfiles del terreno para estimar las pérdidas de propagación. El modelo COST 231 puede ser aplicado en regiones urbanas ubicadas sobre terrenos escarpados donde en el mismo entorno se encuentran montañas, valles, colinas y edificios.

CONCLUSIONES

Las características técnicas, que son, sistema radiante, frecuencias y potencia de las estaciones de transmisión de televisión análoga, deben ser ajustadas para su utilización en el sistema digital.

La potencia de transmisión en televisión digital es aproximadamente entre 10 dB y 15 dB menor a la potencia de transmisión requerida para un sistema de televisión análoga y dependen del radio de cobertura establecido para la estación.

La frecuencia utilizada para la transmisión de la televisión análoga está en la banda de frecuencias VHF, para la transición a la televisión digital se deben adecuar las antenas utilizadas para la transmisión y recepción del servicio que cumplan con la característica de frecuencia UHF.

Para mantener la cobertura del sistema de televisión análoga en el momento de la implantación del sistema de televisión digital, se debe mantener un patrón de radiación similar de la antena utilizada para la transmisión.

Para el diseño de una red de televisión digital es preciso conocer la relación de C/N mínima que debe haber en la recepción. La relación S/N sólo se utiliza en el sistema análogo, debido a que en el sistema digital todas las señales portadoras transmitidas están multiplexadas en tiempo y en frecuencia y es más complejo el análisis por separado de cada una de ellas.

El nivel de intensidad de campo mínimo requerido para obtener un buen nivel de señal en la recepción con televisión análoga es mayor que el requerido por un sistema de televisión digital.

Para evitar interferencia inter símbolo en un sistema de televisión digital, los retardos introducidos no deben superar el valor del intervalo de guarda de y la distancia entre los transmisores debe ser menor a 89,6 Km.

La característica de ortogonalidad de la modulación OFDM permite eliminar interferencias en una red SFN debido a que la posición central de las portadoras en frecuencia coincide con los puntos nulos de las portadoras adyacentes.

Las relaciones de protección para evitar interferencias cocanal, es decir en la misma banda de frecuencia, y de canal adyacente, en diferente banda de frecuencia, se controlan a partir de los filtros de máscara crítica utilizados en la transmisión. Esta relación es medida en la entrada al receptor.

Para la recepción de tipo indoor se exige un nivel de intensidad de campo mínimo mayor que la recepción outdoor, sin embargo es preciso realizar el diseño utilizando como referencia el uso de la antena interior para abarcar la recepción con antena exterior mediante estos valores.

Finalmente es recomendable realizar las mediciones en terreno antes y después del diseño para así ir ajustando los parámetros a los valores recomendados por los estándares lo que permitirá con facilidad corroborar el estudio realizado y los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acuerdo por medio del cual se establecen condiciones técnicas para la prestación del servicio de televisión radiodifundida en tecnología digital en Colombia. (Diciembre 2010). Bogotá: Comisión Nacional de Televisión.
- [2] Alonso Montes, José Ignacio; Briso Rodríguez, César. (2004). Los problemas de las interferencias entre canales en la implementación de la TV digital terrenal en España. Madrid: Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación, COIT.
- [3] Carreño Cardona, Juan Andrés (Febrero, 2010). Tendencias e innovaciones tecnológicas a partir de la televisión digital. Cartagena: AndinaLink' – CNTV.
- [5] Delgado Gutiérrez, Alejandro. (Octubre 2002). Transmisión de señales de TV digital en el estándar terreno DVB-T. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, departamento de electromagnetismos y teoría de circuitos.
- [6] Iles, D.J., 2003 Operational DVB-T SFN Experience in Australia Proceedings of 1999 ABA Broadcast Planning Conference.
- [7] Implementación Televisión Digital. Comisión Nacional de Televisión. [Consultado el día 17 de Octubre 2010]. http://www.cntv.org.co/cntv_bop/
- [8] Miltet, Oliver. (Noviembre 2007). Technical Overview of single frequency network. Australia: Broadcastpapers, Enensys.
- [9] Modelo LOS (LINE OF SIGHT). Xirio Online [Consultado el día 10 de Marzo de 2011]. <http://www.xirio-online.com/>
- [10] Bria, A. & Gómez-Barquero, D. (2005, Septiembre). Scalability of DVB-H deployment on existing wireless infrastructure. *Proceedings, IEEE PIMRC*. Berlín, Alemania.
- [11] Damosso, E. (Ed.). (1999). *Digital mobile radio: COST 231 View on the evolution towards 3rd generation systems*. Bruselas (Bélgica): Commission of the European Communities and COST Telecommunications.
- [12] Deygout, J. (1966). Multiple knife edge diffraction of microwaves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14, 825-873. European Telecommunications Standard Institute [ETSI], (2008, Octubre). *Digital video broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects. ETSI TR 101 190 V1.3.1* (Technical report). Sophia Antípolis, Francia.

[13] ETSI (2009, Junio). Digital video Implementation guidelines. ETSI TR 102 377 V1.4.1 (Technical report). Sophia Antópolis, Francia.

[14] García, A.P., Ortega. H., Navarro, A., & Rodríguez, A. (2003) Estudio del modelo de propagación Walfisch-Ikegami y su desempeño en la banda TDMA colombiana en presencia de relieve, mediante la utilización de una herramienta de planificación celular basada en GIS, *Revista S&T*, 1(1), 13-33.